LTCC 의사 유전체 공진기를 이용한 초소형 전압제어발진기 설계

Design of a Ultra Miniaturized Voltage Tuned Oscillator Using LTCC Artificial Dielectric Resonator

허윤성 · 오현석 · 정해창 · 염경환

Yun-Seong Heo · Hyun-Seok Oh · Hae-Chang Jeong · Kyung-Whan Yeom

요 약

본 논문에서는 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramics) 공정을 이용하여 다층 구조의 의사 유전체 공진기를 설계하고, 이를 HMIC(Hybrid Microwave Integrated Circuit) 형태의 증폭기, 위상천이기와 함께 페루프를 구성하여 초소형 전압 제어 의사 유전체 공진기 발진기(Vt-ADRO: Voltage-tuned Artificial Dielectric Resonator Oscillator)를 제작하였다. 의사 유전체 공진기는 주기적인 도체 패턴과 적층을 통해 기존의 유전체 공진기보다 소형의 크기를 갖는 공진기이다. 의사 유전체 공진기의 형상은 기본 도체 패턴 원판형을 갖고 이것을 적층하는 구조를 선정하였으며, 공진기의 물리적 치수 및 적층 수에 따른 공진 특성을 분석하였다. 소형의 크기로 제작하기 위하여 LTCC 기판의 상부에 의사 유전체 공진기를 내장하고, 하부에 증폭기, 위상천이기를 집적하였다. 제작된 의사 유전체 공진기 발진기는 $13 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ 로 초소형이며, SMT(Surface Mount Technology) 형태를 갖는다. 설계된 발진기는 설계 주파수에서 개루프 발진 조건을 만족하였으며, 페루프 측정 결과, 발진 주파수는 조정 전압 0~5 V에서 2.025~2.108 GHz, 위상 잡음은 100 kHz offset에서 $-109 \pm 4 \text{ dBc/Hz}$, 출력 전력은 $6.8 \pm 0.2 \text{ dBm}$ 을 보이며, PFTN(Power Frequency Tuning Normalized) FOM(Figure Of Merit)은 -30.88 dB 를 보인다.

Abstract

In this paper, we present an ultra miniaturized voltage tuned oscillator, with HMIC-type amplifier and phase shifter, using LTCC artificial dielectric resonator. ADR which consists of periodic conductor patterns and stacked layers has a smaller size than a dielectric resonator. The design specification of ADR is obtained from the design goal of oscillator. The structure of the ADR with a stacked circular disk type is chosen. The resonance characteristic, physical dimension and stack number are analyzed. For miniaturization of ADRO, the ADR is internally implemented at the upper part of the LTCC substrate and the other circuits, which are amplifier and phase shifter are integrated at the bottom side respectively. The fabricated ADRO has ultra small size of $13 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ and is a SMT type. The designed ADRO satisfies the open-loop oscillation condition at the design frequency. As a results, the oscillation frequency range is 2.025~2.108 GHz at a tuning voltage of 0~5 V. The phase noise is $-109 \pm 4 \text{ dBc/Hz}$ at 100 kHz offset frequency and the power is $6.8 \pm 0.2 \text{ dBm}$. The power frequency tuning normalized figure of merit is -30.88 dB .

Key words : Artificial Dielectric Resonator, Vt-ADRO, Closed-Loop Type Oscillator

「이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2011-0003851).」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received February 21, 2012 ; March 30, 2012 ; April 4, 2012. (ID No. 20120221-018)

· Corresponding Author : Kyung-Whan Yeom (e-mail : khyeom@cnu.ac.kr)

I. 서 론

유전체 공진기는 소형, 경량, 저가, 높은 품질 계수와 높은 주파수 안정도의 장점을 제공하며, 이를 이용한 유전체 공진기 발진기는 위상 잡음이 우수하여 통신 시스템의 국부 발진기로 널리 사용되어 왔다^[1]. 그러나 최근의 통신 시스템은 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 수준의 초소형 크기를 갖는 회로를 요구하고 있고, 주파수가 낮을수록 큰 크기를 갖는 유전체 공진기의 적용은 이러한 소형화의 추세에 더 이상 부합하지 않는다. 현재 MMIC 발진기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, MMIC 발진기에 사용되는 공진기는 기판 특성에 의해 대부분 품질 계수가 낮아 이것의 위상 잡음 특성은 유전체 공진기 발진기에 미치지 못하고 있는 실정이다^{[2],[3]}. 또한, 유전체 공진기는 발진기에 적용 시 마이크로스트립 라인(microstrip line)에 커플링하고 이를 능동 회로와 결합시키게 되는데, 이때 평판형 회로가 구현된 기판에 유전체 공진기를 정확한 위치에 고정하기 힘들고, 추가적인 조립 공정을 요구하기 때문에 회로 집적에 불리한 점이 있다. 마이크로스트립 공진기나 SIW(Substrate Integrated Waveguide) 구조를 갖는 공진기를 이용한 발진기의 경우^{[4],[5]}, 집적 면에서 유리한 점이 있으나 여전히 위상 잡음 특성은 탁월하지 않으며, 크기 면에서도 상당 부분 개선된 바 없다.

최근 발표된 의사 유전체 공진기(artificial dielectric resonator)는 품질 계수가 유전체 공진기의 수준을 보이면서도 소형의 크기를 가지는 공진기로서, 이러한 연구는 기존의 유전체 공진기가 적용된 회로의 소형화 가능성을 제시하였다. 의사 유전체 공진기는 얇은 유전체 위에 주기적인 도체 패턴을 구현하고 이를 다수 적층한 구조를 갖는데, 이러한 구조는 이를 구성하는 유전체의 유전율이 높아진 효과를 얻을 수 있어 공진기의 크기가 소형화되는 원리를 이용한 것이다^[6].

의사 유전체 공진기에 대한 연구들은 초기 단계에 있으며, 의사 유전체 공진기의 원리와 구조, 모드의 해석, 커플링 구조 및 구현에 대해 연구가 이루어졌다^[7]. Awa이 저온 동시 소성 다층 세라믹 기판(LT-CC: Low Temperature Co-fired Ceramic) 공정을 이용

하여 소형의 의사 유전체 공진기를 제작하고, 이를 이용한 여파기의 설계에 대한 연구를 발표하였다. 그러나 구현된 의사 유전체 공진기는 손실이 크고, 개별 단품으로 제작되어 집적의 측면에서 여전히 개선되지 않은 단점이 있다^[8]. 또한, 현재까지 의사 유전체 공진기의 회로 적용은 소형화된 여파기에 국한되고 있으며, 이를 이용한 발진기에 대한 연구는 알려진 바가 없다.

본 논문에서는 소형의 의사 유전체 공진기를 설계하고 이를 이용하여 2 GHz 대역의 발진 주파수를 갖는 전압 제어 발진기의 설계 및 제작을 보였다. LTCC 공정을 이용하여 세라믹 기판의 상부에 의사 유전체 공진기를 내장하고, 하부에 발진기 구성에 필요한 능동 회로를 조립하여 집적도를 높여 SMT(Surface Mount Technology) 형태의 의사 유전체 공진기 발진기를 제작하였다. 발진기의 설계 구조는 그림 1과 같이 의사 유전체 공진기, 위상천이기, 증폭기가 결합된 페루프(closed-loop) 형태로 설계하였다^[9]. 페루프 형태의 발진기 설계를 위하여, 고주파에서 측정이 용이한 S-파라미터를 이용하는 개루프(open-loop) 설계 방법을 적용하였다. 개루프 설계 방법은 발진기를 구성하는 부품을 개별 설계할 수 있고, 전기적 주파수 조정 범위(electrical frequency tuning range)를 공진기의 군 지연(group delay)으로부터

그림 1. 페루프 의사 유전체 공진기 발진기 구조(R_1 및 C_2 는 ADR과 증폭기간 부정합을 개선하기 위한 소자임)

Fig. 1. Structure of closed-loop artificial dielectric resonator oscillator(The circuit elements R_1 and C_2 are for improving mismatches between ADR and amplifier).

예측이 가능한 장점이 있다. 발진기 구성을 위하여 HMIC(Hybrid Microwave Integrated Circuit) 형태로 기 제작된 소형의 위상천이기^[10]와 증폭기를 사용하였다. 위상천이기와 증폭기의 특성을 고려하여 발진 조건과 전기적 주파수 조정 범위로부터 의사 유전체 공진기의 설계 사양을 도출하였으며, 원판형의 단순한 기본구조를 갖고, 이를 적층한 형태의 의사 유전체 공진기를 설계, 제작하여 특성을 확인하였다. 이를 바탕으로 발진기를 설계 및 제작하였으며, 측정을 통해 설계 결과와 비교하여 설계의 타당성을 검증하였다. 제작된 의사 유전체 공진기 발진기는 $13 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ 의 초소형 크기를 가지며, $0 \sim 5 \text{ V}$ 의 전압 조정시 발진 주파수는 $2.025 \sim 2.108 \text{ GHz}$, 위상 잡음은 100 kHz offset 주파수에서 $-109 \pm 4 \text{ dBc/Hz}$ 를 갖는다.

II. 의사 유전체 공진기 설계

2-1 의사 유전체 공진기 설계 사양 도출

의사 유전체 공진기의 설계는 먼저 발진기 구성을 위한 설계 목표를 도출하고, 구조를 선택한 후, 선정된 구조를 설계 목표에 부합하도록 시뮬레이션하는 과정을 수행한다. 의사 유전체 공진기의 설계 사양으로는 공진 주파수, 군 지연, 삽입 손실, 반사 손실, 공진 특성이 있다. 공진 주파수는 목표로 하는 발진 주파수 대역이어야 하고, 군 지연은 전기적 주파수 조정 범위와 위상천이기의 위상천이량으로부터 결정되며^[9], 삽입 손실과 반사 손실은 발진 조건을 만족하도록 결정하여야 한다. 본 논문에서 목표로 하는 의사 유전체 공진기 발진기는 페루프 형태의 구조를 갖기 때문에 공진 주파수에서 통과 특성을 가져야 한다.

발진 주파수는 2 GHz 대역으로 의사 유전체 공진기는 2 GHz 대역의 공진 주파수를 가져야 한다. 또한, 80 MHz 이상의 넓은 전기적 주파수 조정 범위를 목표로 하는데, 기 제작된 위상천이기는 약 $\pm 40^\circ$ 의 위상천이량을 갖는다^[10]. 따라서 군 지연은 식 (1)에 의해 결정되므로 공진기는 약 2.8 nsec 정도의 군 지연을 가져야 한다^[9].

$$\Delta f = \frac{1}{180} \frac{\theta}{t_d} \quad (1)$$

여기서 Δf 는 전기적 주파수 조정 범위를 나타내며, θ 는 위상천이기 최대 위상 변화량의 $1/2$, t_d 는 공진기의 군 지연을 나타낸다. 또한, 페루프 구조 발진기의 발진 조건을 만족하기 위하여 증폭기의 이득은 증폭기를 제외한 나머지 회로의 손실보다 커야 한다. 기 제작된 증폭기는 2 GHz 대역에서 약 14 dB 의 이득을 가지며, 위상천이기는 약 5 dB 의 삽입 손실을 가지므로 공진기의 삽입 손실은 추가로 발생하는 손실을 고려하여 약 5 dB 이내로 결정하였고, 반사 손실은 대역 내에서 10 dB 이하를 목표로 한다.

2-2 의사 유전체 공진기의 구조 및 설계

2-2-1 단층 의사 유전체 공진기

그림 2는 본 논문에서 제안한 적층형 의사 유전체 공진기를 구성하기 위한 기본 구조의 평면도와 단면도이다. 공진기는 유전체의 높이(H)가 0.3 mm 의 매우 낮은 스트립라인(stripline) 구조로서 약 반 파장의 둘레를 갖는 원판형으로 구현된다. 공진기는 공진 주파수에서의 서셉턴스(susceptance) 기울기에 비례하여 군 지연이 높아지게 된다. 서셉턴스 기울기는 공진기의 커패시턴스가 증가함에 따라 커지게 되며, 그림 2의 원판형 공진기의 경우, 공진기와 접지면 사이 커패시턴스의 조절이 용이한 구조이다. 내부의 직사각형 슬롯(slot 2)의 크기($a \times b$)는 $1 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, slot 1의 간격 g 는 0.15 mm 이고, 원판형의 공진기는 2.66 mm 의 반지름(R)을 갖게 되며, 이때 공진 주파

그림 2. 단층 의사 유전체 공진기의 구조
Fig. 2. Single layer structure of the ADR.

표 1. 기본형 공진기의 물리적 파라미터와 치수

Table 1. Physical parameters and dimensions of unit resonator.

	a [mm]	b [mm]	R [mm]	g [mm]	W [mm]	H [mm]
값	1	0.5	2.66	0.15	7.9	0.3

(a) S-파라미터

(a) S-parameter

(b) 군 지연

(b) Group delay

그림 3. 의사 유전체 공진기 기본형의 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation results of unit ADR.

수는 약 6 GHz가 된다. 이 공진 주파수는 원판의 반지름에 따라 변하며, 반지름이 클수록 공진 주파수는 낮아지고, 반지름이 작아지면 공진 주파수는 높아지게 된다. 따라서 기본형 구조의 공진 주파수는 반지름을 조정하여 조정할 수 있다. 그리고 공진기는 바닥면이 정사각형인 도체 박스($7.9 \times 7.9 \times 0.3 \text{ mm}^3$) 안에 내장된다. 표 1에 설계된 기본형 공진기의 물리적 파라미터와 치수를 정리하여 나타내었다. 또

한, 그림 3에 그림 2의 구조를 ADS의 Momentum을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 보였다. 공진 주파수는 약 6 GHz이며, 군 지연은 0.47 nsec임을 알 수 있다.

2-2-2 적층 의사 유전체 공진기

공진기 기본형의 공진 주파수는 6 GHz이며, 군 지연은 발진기에서 요구되는 군 지연 3.1 nsec보다 크게 못 미치게 된다. 군 지연을 보다 크게 하기 위해 그림 4

(a) 의사 유전체 공진기의 적층 단면도(B-B')

(a) Stacked cross section of ADR(B-B')

(b) 적층용 단일 공진기

(b) Single resonator for the stack

(c) 비아를 갖는 그라운드($D_1 = 0.6 \text{ mm}$, $D_2 = 0.3 \text{ mm}$)(c) Ground with via($D_1 = 0.6 \text{ mm}$, $D_2 = 0.3 \text{ mm}$)

그림 4. 적층된 의사 유전체 공진기 구조

Fig. 4. Structure of stacked ADR.

와 같이 4개의 기본형 공진기를 적층하여 의사 유전체 공진기를 구성하였다. 그림 4(a)는 공진기의 적층 단면도로 그림 2의 단층 의사 유전체 공진기 위에 그림 4(b)와 같은 공진기 기본형을 그림 4(c)와 같은 비아를 이용하여 연결하였다. 연결 비아는 그림 4(a)와 같이 접지면을 통과하게 되는데, 접지면을 그림 4(c)와 같이 형성하여 병렬로 연결하였다. 적층에 따른 변화를 Ansoft사의 HFSS로 2층, 4층, 8층까지 적층하면서 시뮬레이션하여 확인하였으며, 이 결과를 그림 5에 도시하였다. 적층을 할수록 공진 주파수는 감소하고, 군 지연은 증가하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 설계 목표 주파수는 2 GHz 대역이고, 80 MHz 이상의 전기적 주파수 조정 범위를 가지려면 약 3.2 nsec의 군 지연이 필요하기 때문에, 이에 가장 만족하는 4층으로 적층하는 구조를 선택하였다. 이와 같이 공진기를 적층할 경우, 병렬로 연결된 공진기의 커패시턴스가 증가하여 공진 주파수가 낮아지게 된다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 공진기의 커패시턴스가 커짐에 따라 군 지연이 증가함을 알 수 있다. 그림 6에 4층으로 적층된 공진부의 설계 구조를 도시하였다. 제작 후 측정을 고려하여 상층에 CPW (Coplanar Waveguide) 구조를 입출력 포트 면에 구현하고, 도체 박스 내에 있는 공진기와 비아를 이용하여 연결하였다. 이 구조를 바탕으로 국내 LTCC 가공 업체 (주)RN2 테크놀로지의 공정^[11]을 이용하여 적층된 의사 유전체 공진기를 제작하였다.

그림 5. 공진기의 적층에 따른 공진 주파수 및 군 지연

Fig. 5. Resonance frequency and group delay versus number of stacked resonators.

그림 6. 측정을 고려한 4층 적층 공진기의 구조

Fig. 6. Structure of 4-layer stacked resonator for measurement.

(a) S-파라미터

(a) S-parameter

(b) 군 지연

(b) Group delay

그림 7. 적층 의사 유전체 공진기의 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 7. Simulated and measured results of 4-layer stacked artificial dielectric resonator.

그림 7에 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교, 도시하였다. 공진부의 측정은 온-웨이퍼 프로브와 Agilent사의 N5230A 회로망 분석기(network analyzer)를 이용하였다. HFSS 시뮬레이션을 통해 얻어진 공진부의 공진 주파수는 약 2.09 GHz이며, 삽입 손실은 약 -2 dB, 반사 손실은 약 -14 dB, 군 지연은 약 2.9 nsec를 보였다. 또한, 제작된 공진기의 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 유사함을 확인하였다. 공진 주파수의 경우 2.13 GHz로 시뮬레이션 결과보다 약 40 MHz 상향 이동되었으나, 이러한 오차는 제작 공차에 의한 것으로 사료되며, 반사 손실과 삽입 손실의 경우, 시뮬레이션 결과와 유사한 값을 보였다. 또한, 공진기의 통과 위상은 56.6°, 군 지연은 2.6 nsec로 측정되었다.

III. 의사 유전체 공진기 발진기 설계

3-1 발진기의 구성

본 논문에서 발진기는 4층 구조의 의사 유전체 공진부와 위상천이부, 증폭부로 구성되며, 각 부는 50 Ω 선로와 비아로 연결되어 페루프를 구성하게 된다. 위상천이기^[10]는 박막 세라믹 공정을 통해 제작하였으며, 선형성이 좋은 장점을 갖고 있다. 위상천이기의 위상변화량은 79°을 보인다. 증폭부는 Hittite사의 HMC397^[12]을 사용하여 설계하였다. HMC397 증폭기는 주로 gain block으로 사용함에 따라 상당한 대역에서 일정한 이득을 갖고, 군 지연이 낮다. 증폭기의 측정 결과, 이득은 약 14.6 dB, 위상은 130°, 반사 손실은 약 -11.3 dB을 보인다.

3-2 ADRO의 구조

본 논문의 의사 유전체 공진기 발진기 회로도도 그림 1과 같고, 설계된 단층 구조를 그림 8(a)에 나타내었다. 제안된 발진기는 LTCC를 다층으로 적층한 구조이며, 소형화를 위하여 LTCC 기판의 하부에는 HMIC 형태로 제작된 위상천이기와 증폭기를 집적하고, 상부에는 그림 6과 같은 구조를 갖는 의사 유전체 공진기를 내장하였다. 위상천이기와 증폭기 및 공진기의 연결은 각각 50 Ω 선로와 비아를 통해 페루프를 이루고 있다. 이때, 하부의 위상천이기와 증폭기를 외부로부터 보호를 위하여 커버를 제작하여

그림 8. 설계된 ADRO의 구조
Fig. 8. Designed structure of ADRO.

부착하였다. 그림 8(b)에는 설계된 의사 유전체 공진기 발진기의 3D 구조를 보였다. 발진기의 형태는 기판에 직접 조립이 가능하도록 SMT 구조로 설계하였다. 증폭기와 위상천이기에 각각 전압을 인가하는 단자(V_{Amp} , V_{tune})와 발진 출력 단자(Output), 그라운드 단자들을 외곽에 형성하였다. 출력단자는 발진출력을 SLC(Single Layer Capacitor)로 커플링을 하여 공급되며, 커플링 커패시터(C_1)로는 0.5 pF을 사용하였다. 각 부를 연결하기 위한 전송선로들은 발진 조건 중 위상조건을 만족하도록 길이를 조정하여 설계하였다. 저항(R_1)은 발진기의 반사 손실 특성을 개선하기 위한 저항이며, 시뮬레이션을 통해 100 Ω 으로 결정하였고, 직렬로 연결된 SLC(C_2)는 DC 블

표 2. 주파수 2.13 GHz에서의 발진기를 구성하는 개별 부품 및 전송선의 RF 특성

Table 2. Physical parameters and dimensions of unit resonator at frequency of 2.13 GHz.

구분	S_{21} [dB]	S_{21} [deg]	t_d [nsec]
ADR	-2.8	56.6	2.6
증폭기	14.6	-130.5	0.04
위상천이기 (3V)	-4.9	-91.8	0.34
선로 1	-0.01	32.3	0.04
선로 2	-1.96	31.3	0.04
선로 3	-0.41	30.1	0.03
본딩 및 비아	-0.1	72.8	0.05
Cascade 연결	4.42	0.8	3.14

록용 커패시터로 1,000 pF를 사용하였다.

표 2에는 ADR의 공진 주파수 2.13 GHz에서 발진기를 구성하는 개별 부품 및 전송선의 RF 특성을 도시하였다. 이들을 cascade 연결하였을 경우, S_{21} 의 크기와 위상 특성은 발진 조건을 만족함을 알 수 있으며, 군 지연은 3.14 nsec로 약 71 MHz의 전기적 주파수 조정 범위를 가질 것으로 예상된다.

IV. 제작 및 측정 결과

4.1 의사 유전체 공진기 발진기 제작

제작된 의사 유전체 공진기 발진기를 그림 9에 보였다. 제작된 발진기의 크기는 $13 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ 이다.

그림 9(a)에 커버를 덮지 않은 상태로 발진기의 하단에서 바라본 내부 조립 사진을 보였다. 위상천이기와 증폭기는 에폭시를 사용하여 조립하였고, 리본 본딩을 통해 선로 및 바이어스 단자와 연결하였다. 저항(R_1 및 R_2)은 박막(thin film) 공정을 통해 구현하였으며, 커플링을 위한 커패시터(C_1)와 DC 블록을 위한 커패시터(C_2)는 각각 에폭시를 통해 부착하였다. 그림 9(b)에 발진기의 상단에서 바라본 사진을 보였다. 그림 9(b)에 표시된 ①은 의사 유전체 공진기에 연결되는 비아 단자이며, ②는 증폭기와 위상천이기로 연결되는 비아 단자로 그림 9(a)의 ③으로 연결된다. 이 비아 단자들은 그림 8(a)에 표시된 번호와 동일하다.

제작된 발진기의 발진 가능성을 보기 위하여 개

(a) 하부
(a) Bottom view

(b) 상부
(b) Top view

그림 9. 제작된 ADRO($13 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$)
Fig. 9. Fabricated ADRO($13 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$).

루프 측정을 수행하였다. 그림 9(b)의 출력단자를 저항(R_2)과 본딩으로 연결하여 출력단자의 임피던스를 50 Ω 으로 두고, 상부의 CPW2의 전송선은 본딩으로 연결한 상태에서 CPW1의 두 전송선 끝에서 온-웨이퍼 프로브를 통해 2-port로 측정한다. 이 때 위상천이기와 증폭기의 전압은 DC-프로브를 통해 공급하였다. 그리고 발진기의 페루프 측정은 출력단자와 R_2 와의 연결을 끊고, CPW1의 전송선을 연결한 후 출력단자에서 1-port로 측정한다.

그림 10에 Agilent사의 N5230A 회로망 분석기를 사용하여 측정한 의사 유전체 공진기 발진기의 개루프 S-parameter를 나타내었고, 그림 11에 개루프의 군지연을 나타내었다. 측정 결과를 통해 약 2.1 GHz 부근에서 발진할 것으로 예측되며, 군 지연은 약 2.7

그림 10. 측정된 발진기의 개루프 S-parameter
Fig. 10. The measured open-loop S-parameter of the oscillator.

그림 11. 측정된 발진기의 군 지연
Fig. 11. The measured group delay of the oscillator.

nsec로 식 (1)에 의해 약 82 MHz의 전기적 주파수 조정 범위를 가질 것으로 예측된다. 측정된 군 지연은 표 2의 군 지연과 차이를 보이게 되는데, 이는 각 부분의 입·출력 임피던스가 기준 임피던스인 50 Ω과 차이가 있어 나타난 것으로 사료된다.

발진기는 그림 12와 같이 지그를 제작하여 조립한 후 최종 측정을 하였다. PCB는 유전율 3.66, 두께 30 mil의 Rogers4350 기판을 사용하여 제작하였다. 전원 및 주파수 조정 전압은 지그의 좌·우 커넥터를 통해서 증폭기와 위상천이기에 공급되며, 출력부의 커넥터를 통해 신호원 분석기(signal source analyzer)로 측정을 하게 된다.

4-2 발진기 측정 결과

발진기 측정은 Agilent사의 E5052A 신호원 분석

그림 12. 지그에 조립된 ADRO
Fig. 12. ADRO assembly on test jig.

기를 사용하였다. 측정 시 증폭기에는 4 V의 전압을 인가하고, 위상천이기에는 0~5 V의 전압을 가변하여 인가한다. 측정된 결과를 그림 13에 도시하였다. 그림 13(a)는 위상천이기의 가변 전압 3 V에서 발진 주파수를 나타낸다. 2.079 GHz의 발진 주파수를 보이며, 출력 전력은 6.8 dBm이다. 그림 13(b)는 주파수 조정 특성이며, 위상천이기의 가변 전압 0~5 V 내에서 약 84 MHz의 전기적 주파수 조정 범위를 갖는다. 그림 13(c)는 가변 전압 3 V에서 위상 잡음 특성이다. 측정된 위상 잡음은 100 kHz offset 주파수에서 약 -108 dBc/Hz의 특성을 보인다. 그림 13(d)는 주파수 조정 범위 내에서 위상 잡음의 특성을 나타낸다. 주파수 offset이 10 kHz일 때 -78 ± 4 dBc/Hz 근처의 위상 잡음 특성을 보이며, 100 kHz일 때 -109 ± 4 dBc/Hz의 위상 잡음을 보인다.

본 논문과 다른 유전체 공진기 발진기와의 비교를 위해 식 (2)에 나타낸 PFTN(Power Frequency Tuning Normalized) FOM(Figure Of Merit)을 사용하였고, 비교한 결과를 표 3에 나타내었다^[13].

$$PFTN = 10 \log \left[\frac{kT}{P} \left(\frac{f_{tune}}{f_{off}} \right)^2 \right] - L\{f_{off}\} \quad (2)$$

여기서 k 는 볼츠만 상수, T 는 상온에서의 절대 온도, P 는 발진기에서 소모된 전체 DC 전력, f_{tune} 은 전기적 주파수 조정 범위, f_{off} 은 오프셋 주파수, $L\{f_{off}\}$ 는 위상 잡음을 의미한다. PFTN은 dB 단위로 표현되는 FOM으로서 값이 클수록 발진기의 성능이 좋다. 본 논문에서 제안된 발진기의 PFTN은 -30.88

그림 13. ADRO 측정 결과

Fig. 13. The measured results of ADRO.

표 3. 본 연구와 선행 연구 및 상용 제품과의 성능 비교

Table 3. Comparison of this work with the previous work and commercially available products.

	중심 주파수 [GHz]	크기 [mm ³]	전기적 주파수 조정 범위[MHz]	위상 잡음 (100 kHz offset)[dBc/Hz]	소모된 DC 전력 [mW]	PFTN [dB]
본 연구	2.08	13×13×3	84	-108	224	-30.88
선행 연구 ^[9]	5.3	36×52×20	82	-104	235	-35.29
상용 제품 ^[14]	2.15	25×41×16	0.73	-130	520	-53.75

dB로 선행 연구보다 약 4 dB, 상용 제품보다 약 23 dB 개선된 성능을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 원판형의 의사 유전체 공진기를 4 층으로 적층하여 LTCC 공정으로 2 GHz 대역의 소

형 의사 유전체 공진기를 설계하고, HMIC 형태로 위상천이기, 증폭기와 함께 페루프를 구성하여 초소형 의사 유전체 공진기 발진기를 제작하였다. 제작된 발진기는 SMT 형태이며, 크기는 13×13×3 mm³로 선행 연구인 5 GHz 대역 유전체 공진기 발진기와 비교했을 때, 약 1/70배 이상 소형화를 달성하였고,

LUCIX사의 상용 제품과 비교했을 때, 약 1/30배 이상 소형화를 달성하였다. 제작된 발진기는 2.079 GHz의 발진 주파수, 84 MHz(2.025~2.108 GHz)의 전기적 주파수 조정 범위를 보인다. 위상 잡음은 -109 ± 4 dBc/Hz (@100 kHz offset)이고, 출력 전력은 6.8 ± 0.2 dBm을 보이며, PFTN은 -30.88 dB를 보인다. 향후 연구를 통해 위상 잡음 특성을 더욱 보완한다면 소형의 의사 유전체 공진기를 적용한 발진기로서 통신 및 군수 분야에서 널리 사용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 염경환, 능동초고주파회로 설계 입문, 홍릉과학출판사, 2006년.
- [2] C. G. Hwang, J. S. Lee, J. H. Kim, N. H. Myung, and J. I. Song, "Simple K-band MMIC VCO utilizing a miniaturized hairpin resonator and a three-terminal p-HEMT varactor with low phase noise and high output power properties", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp. 229-231, Jun. 2003.
- [3] S. G. Park, J. H. Kim, S. W. Kim, K. S. Seo, W. B. Kim, and J. I. Song, "A Ka-band MMIC oscillator utilizing a labyrinthine PBG resonator", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 11, pp. 727-729, Nov. 2005.
- [4] S. W. Seo, H. Y. Jung, J. H. Jeong, and C. H. Park, "Design of an X-band oscillator using novel miniaturized microstrip haripin resonator", *Proc. of Asia-Pacific Microw. Conf.*, pp. 1-4, Dec. 2007.
- [5] F. F. He, K. Wu, W. Hong, L. Han, and X. Chen, "A low phase-noise VCO using an electronically tunable substarte integrated waveguide resonator", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 58, no. 12, pp. 3452-3458, Dec. 2010.
- [6] A. Munir, N. Hamanaga, H. Kubo, and I. Awai, "Artificial dielectric rectangular resonator with novel anisotropic permittivity and its TE_{106} mode waveguide filter application", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E88-C, no. 1, pp. 40-46, Jan. 2005.
- [7] T. Yamamoto, I. Awai, A. Sanada and H. Kubo, "Coupled resonators on both sides of a printed circuit board and their applications", *IEICE Trans. Electron. Part 2*, vol. 89, no. 4, pp. 51-59, Apr. 2006.
- [8] I. Awai, "Artificial dielectric resonators for miniaturized filters", *IEEE Microw. Magazine*, vol. 9, no. 5, pp. 55-64, Oct. 2008.
- [9] 정해창, 오현석, 양승식, 염경환, "개루프 방법에 의한 확장된 전기적 주파수 조정 범위를 갖는 유전체 공진기 발진기의 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 20(6), pp. 570-579, 2009년 6월.
- [10] 오현석, 최재홍, 정해창, 허윤성, 염경환, "2 GHz 선형 위상 천이 특성을 갖는 소형 아날로그 위상천이기", 한국전자과학회논문지, 22(1), pp. 114-124, 2011년 1월.
- [11] LTCC Design Guide, *LTCC Design Guide Line*, RN2 Technologies, [Online] Available: <http://www.rn2ltcc.com/>
- [12] HMC397, *InGaP HBT GAIN BLOCK MMIC Amplifier, DC - 10 GHz Hittite*, [Online] Available: <http://www.hittite.com/>
- [13] Donhee Ham, Ali Hajimiri, "Concepts and methods in optimization of integrated LC VCOs", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 36, no. 6, pp. 896-909, Jun. 2001.
- [14] LO-021-E4B, *Free Running DRO, LUCIX*, [Online] Available: <http://www.lucix.com/>

허 윤 성

2010년 8월: 충남대학교 전자전파
정보통신과 (공학사)
2010년 9월~현재: 충남대학교 전파
공학 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 능동 회로
및 시스템 설계

정 해 창

및 시스템 설계

2008년 2월: 충남대학교 전자전파
정보통신공학과 (공학사)
2010년 2월: 충남대학교 전자전파
정보통신공학과 (공학석사)
2010년 2월~현재: 충남대학교 전
자전파정보통신공학과 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 능동 회로

오 현 석

파전기공학연구소 객원연구원
[주 관심분야] 마이크로파 회로 설계

2005년 2월: 충남대학교 전파공학
과 (공학사)
2007년 2월: 충남대학교 전파공학
과 (공학석사)
2011년 8월: 충남대학교 전파공학
과 (공학박사)
2011년 9월~현재: 충남대학교 전

염 경 환

연구소 선임연구원 (MIC팀 팀장)
1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원
1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원
1991년 8월: (주) LTI
1995년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
[주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 시스템, MMIC 설계

1976년~1980년: 서울대학교 전자
공학과 (공학사)
1980년~1982년: 한국과학기술원 전
기 및 전자과 (공학석사)
1982년~1988년: 한국과학기술원 전
기 및 전자과 (공학박사)
1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품